

<sup>1</sup>В.І. Коробов, канд. техн. наук  
<sup>2</sup>Н.О. Клешня

## ВПЛИВ ПОДОВЖНИХ МІКРОБОРОЗДОК НА ГІДРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР ТЕРТЯ ПЛАСТИНИ

<sup>1</sup>Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, e-mail: korobov@ukr.net

<sup>2</sup>Інститут комп'ютерних технологій НАУ

*За допомогою вагових вимірів у гідродинамічній трубі показано, що для дрібноребристої подовжньої обтічної поверхні існує діапазон параметрів, в якому опір турбулентного тертя менший, ніж у гладкої плоскої пластини з такою самою площею проекції. При цьому максимальне зниження коефіцієнта тертя за рахунок оребрення становило до 16%.*

### Вступ

Розробка заходів, спрямованих на зниження гідродинамічного опору поверхні, є важливим резервом підвищення аеродинамічної досконалості літальних апаратів і гідротранспортних систем. У наш час досить докладно вивчений ряд засобів зменшення опору тертя. Дана робота присвячена дослідженню можливості використання методу зниження турбулентного тертя за допомогою дрібноребристої поверхні (ріблети), ребра якої спрямовані уздовж потоку.

### Аналіз публікацій

Одним із перших досліджень у цьому напрямку можна вважати працю [1], в якій експериментально було показано, що при турбулентному режимі течії в ядрі каналу трикутного поперечного перетину потік у кутових областях (у діапазоні до 30°) залишається ламінарним на ділянці до 40% по висоті трикутника. Було висловлено припущення, що спостерігається ефект, який обумовлений придушенням турбулентності в кутових областях внаслідок малості поперечних масштабів.

У праці [2] розглянута фізична картина течії біля ріблетів, де вказується, що всередині ріблетів потік рухається дуже повільно, а бічні переміщення рідини поблизу ріблетів стають незначними.

У праці [3] запропонована модель процесу, яка ґрунтується на ідеї про те, що зниження опору не є безпосереднім результатом взаємодії з турбулентною структурою, а визначається характером течії в'язкого середовища в рифленийій поверхні. Течії в канавках відповідають малі числа Рейнольдса. Зона за своїм характером є повзучою, тому місцеві дотичні напруги на стінці малі і максимальні на верхівці канавки через наявність градієнта швидкості. У такому випадку менша частка поверхні витримує великі дотичні напруги. У праці [4], де розглянуто вплив оребрення на частоту турбулентних викидів і опір тертя при дозвуковій швидкості потоку, висота

ребер  $h$  прямокутної форми варіювалася в діапазоні  $h^+ = 45 - 111$ , а відстань  $S$  між ними змінювалася в межах  $S^+ = 190 - 373$ . Значення  $h$  і  $S$  подані в безрозмірному вигляді в одиницях закону стінки:

$$h^+ = h u_\tau / \nu, \quad S^+ = S u_\tau / \nu,$$

де  $u_\tau$  – динамічна швидкість;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

При певних значеннях висоти і відстані між ребрами, частота турбулентних викидів зменшується на 20 – 25%, а опір тертя оребреної поверхні на 3 – 4% менше порівняно з опором тертя гладкої пластини.

У праці [4] згадано про інші експериментальні дослідження впливу прямокутного оребрення на опір, в яких були отримані протилежні результати: при  $h^+ = 70 - 150$  та  $S^+ = 50 - 1100$  оребрення приводило до збільшення сили тертя на 10 – 50%. У цій роботі відзначено, що трикутне ребро за інших рівних умов менше збільшує омивану потоком поверхню.

Досить докладне експериментальне дослідження турбулентного опору тертя оребрених поверхонь проведено в працях [4–9], де було досліджено декілька десятків поверхонь із різним профілем оребрення. Для штучного збільшення товщини прилежового шару використовувався дровий турбулізатор.

У працях [4; 7] вказуються оптимальні розміри ріблетів:  $h^+ \approx S^+ \approx 10 - 14$ . Використання ріблетів на пластині і тілах обертання, тобто в течії практично без градієнта тиску, призвело до зниження опору до 7 – 8%, а в деяких випадках до 10%.

### Мета досліджень

У результатах досліджень оребрених поверхонь відносна зміна тертя наводиться залежно від безрозмірної відстані між ребрами  $S^+$  у координатах закону стінки. Це пов'язано з гіпотезою про вплив подовжніх канавок на зародження і розвиток турбулентних пристінних викидів у ла-

мінарному підшарку. Як відомо, область зародження турбулентних викидів обмежена за товщиною прилежового шару координатою  $y^+ \approx 30$ , а поперечна відстань між ними в безрозмірному вигляді  $Z^+ \approx 100$ . Тому вважається за доцільне виконати дослідження на поверхні такої геометрії, щоб співвідношення характерних розмірів її оребрення було близьким до згаданих параметрів.

### Експериментальне дослідження

У даній роботі наведені результати експериментального дослідження опору тертя плоскої оребреної поверхні порівняно з гладкою поверхнею. Геометричні параметри оребрення наступні. Перетин ребра трикутний з кутом при вершині  $40^\circ$  з округленою вершиною. Висота ребра  $h = 0,4$  мм. Між трикутними виступами є плоска площадка, розмір якої дорівнює основі ребра. Крок між ребрами  $S = 0,8$  мм. Відношення  $S/h = 2$  і близьке до співвідношення між параметрами  $Z^+$  і  $y^+$ .

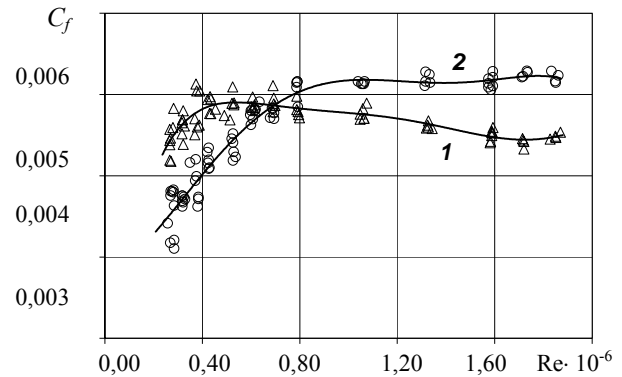
Поверхні, що тестувалися, були виконані у вигляді тонких прямокутних пластин, які розташовувалися на моделі. Модель являла собою тонкий циліндр (подовження  $\lambda_{\text{цпл}} > 40$ ) із хрестоподібно закріпленими на ній чотирма досліджуваними тонкими прямокутними пластинами малого подовження  $\lambda_{\text{пл}} = L_{\text{пл}} / b_{\text{пл}} \approx 0,33$ , де  $L_{\text{пл}}$ ,  $b_{\text{пл}}$  – відповідно розмах і хорда пластини. Відношення розмаху пластини до діаметра циліндра  $L_{\text{пл}} / d_{\text{цпл}} \approx 12,5$ .

Випробування проводилися в гідродинамічній трубі з закритою робочою частиною, що має квадратний поперечний перетин розміром  $0,4 \times 0,4$  м і довжину 1,8 м. Швидкість потоку в робочій ділянці труби  $U_\infty$  змінювалася в межах від 0,3 м/с до 2,5 м/с. Швидкість потоку реєструвалася приймачем швидкісного напору, чутливим елементом якого був напівпровідниковий калібрований термокомпенсований диференціальний датчик тиску з нормованим вихідним сигналом. Модель установлювалася всередині робочої ділянки гідродинамічної труби і своєю хвостовою частиною кріпилася до тензометра з напівпровідниковими датчиками, що розташовані всередині обтічника державки. У дослідях вимірювалися значення швидкості потоку і гідродинамічний опір подовжньо обтічної моделі, що через аналого-цифровий перетворювач реєструвалися в ПЕОМ. Число Рейнольдса в дослідях змінювалося від  $Re = 2,4 \cdot 10^5$  до  $2 \cdot 10^6$ .

Результати багатократних вимірювань опору турбулентного тертя гладкої поверхні відтворювалися з ймовірною похибкою  $\pm 2,1$  % при малих

швидкостях потоку. Зі зростанням швидкісного напору похибка зменшувалася до значень  $\pm 0,68$ % наприкінці діапазону вимірювань.

Виміряні значення коефіцієнта тертя за числами Рейнольдса для гладкої пластини  $C_{F0}(Re)$  і для поверхні з мікробороздками  $C_{Frib}(Re)$  зображені на рисунку.



Коефіцієнт гідродинамічного тертя залежно від числа Рейнольдса:

1 – для гладкої пластини  $C_{F0}(Re)$ ; 2 – для поверхні з мікробороздками  $C_{Frib}(Re)$

Дані для гладкої пластини цілком задовільно узгоджуються з відомими результатами [10].

Результати вагових вимірювань випробуваних поверхонь для найбільш характерних режимів обтікання наведені в таблиці. Дані подані у вигляді залежності відносного коефіцієнта тертя  $\xi$  від числа Рейнольдса, де

$$\xi = [(C_{F0} - C_{Frib}) / C_{F0}] 100\%.$$

### Гідродинамічна ефективність дрібноребристої поверхні при різних числах Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-6}$	Smooth	Riblet			$\xi$ , %
	$C_{F0} \cdot 10^3$	$C_{Frib} \cdot 10^3$	$S^+$	$h^+$	
0,28	5,48	4,57	11,94	6,0	16,6
0,32	5,66	4,73	13,8	6,9	16,4
0,40	5,82	5,02	17,0	8,5	13,7
0,70	5,85	5,85	30,0	15	0
1,20	5,70	6,17	51,2	25,6	-8,2
1,60	5,48	6,20	68,0	34,0	-13

### Висновки

Для оребреної поверхні є діапазон швидкостей  $U_\infty$ , в якому її опір тертя виявляється меншим, ніж у гладкої пластини. На відміну від відомих робіт максимальне зниження коефіцієнта тертя за рахунок оребрення з модифікованою геометрією, у порівнянні з гладкою пластиною, досягає більших значень і становить 14 – 16,5%, а оптимальні значення параметра  $S^+$ , що відпові-

дають мінімуму поверхневого тертя, лежать у більшому діапазоні  $S^+ \approx 12 - 20$ .

Із збільшенням швидкості підвищення опору оребреної поверхні порівняно з гладкою пластиною, відбувається не настільки інтенсивно. У дослідях коефіцієнт тертя не досягнув значень, що відповідають перевищенню площі змоченої поверхні, що для оребреної моделі на 53% більше, ніж у гладкої пластини. Це може вказувати на структуруючу дію ріблетів, що призводить до підвищення стійкості пристінних когерентних вихрових структур у примежовому шарі.

#### Список літератури

1. *Eckert E.R., Irvine T.F.* Flow in corners of passages with noncircular cross sections // *Trans. ASME*. – 1956. – Vol. 78. – №4. – P. 709–718.
2. *Becher E.V., Smith C.R.* A combined visualisation – anemometry study of turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications // *AIAA Pap.* – 1985. – № 0548. – P. 8.
3. *Galagher T.A., Thomas A.S.W.* Turbulent boundary layer characteristics over streamwise grooves // *AIAA Pap.* – 1984. – № 2185. – P. 9.
4. *Уолли М.Д.* Сопротивление пластины с продольными пазами и ребрами // *Снижение вязкого трения*. – М.: Машиностроение. – 1984. – С. 189–206.
5. *Walsh M.J., Weinstein L.M.* Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins // *AIAA Pap.* – 1978. – № 1161. – P. 11.
6. *Walsh M.J.* Turbulent boundary layers drag reduction using riblets // *AIAA Pap.* – 1982. – № 0169. – P. 8.
7. *Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины* / Г.В. Енютин, Ю.А. Лашков, Н.В. Самойлова и др. // *Изв. АН СССР. МЖГ*. – 1987. – №2. – С. 140–145.
8. *Park S.-R., Wallace J.M.* Flow alteration and drag reduction by riblets in boundary layer // *AIAA Journal*. – 1994. – Vol. 32, №1. – P. 31–38.
9. *Белов И.А., Енютин Г.В., Литвинов В.М.* Влияние продольного и поперечного оребрения плоской пластины на ламинарно-турбулентный переход // *Учен. зап. ЦАГИ* – 1994. – Т. 21. – №6 – С. 107–111.
10. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 742 с.

Стаття надійшла до редакції 19.01.05.

В.И. Коробов, Н.А. Клешня

Влияние продольных микробороздок на гидродинамическое сопротивление трения пластины

С помощью весовых измерений в гидродинамической трубе показано, что для мелкорребристой продольно обтекаемой поверхности существует диапазон параметров, в котором сопротивление турбулентного трения меньше, чем у гладкой плоской пластины с такой же площадью проекции. При этом максимальное снижение коэффициента трения за счет оребрения составило до 16%.

V.I. Korobov, N.O. Kleshnya

The influence of longitudinal micro grooves on hydrodynamic friction drag of a plate

Weight measurements in a water tunnel have shown that there exist a range of parameters of longitudinally fine-ribbed surface such that turbulent friction in flow over the surface is less than that over a smooth flat plane of the same projected area. Maximum drag reduction due to ribbing is up to 16%.